

南極域における VLF ヒス・ソーサーの発生領域

芳野起夫*・福西 浩**・佐藤夏雄**・尾崎孝之*・岩瀬政之*

Occurrences of VLF Hiss and Saucer Emissions in the Southern Polar Region

Takeo YOSHINO*, Hiroshi FUKUNISHI**, Natsuo SATO**,
Takayuki OZAKI* and Masayuki IWASE*

Abstract: Satellite data acquisition facilities for ISIS-1 and 2 were built up at Syowa Station in January 1976, and the VLF wideband and topside sounder data have been received on the routine basis since April 1976. The occurrence regions of VLF hiss and saucer emissions in the southern polar region were studied statistically by using the ISIS-1 VLF data of the 110 orbits and the ISIS-2 VLF data of the 155 orbits which were received by the 17th and 18th Japanese Antarctic Research Expedition wintering parties in 1976 and 1977. It is found that the hiss emission region with the occurrence probability larger than 50% is located at 75°–85° geomagnetic latitude in 10–14 MLT in the dayside and at 65°–80° geomagnetic latitude in 20–02 MLT in the night side, while the saucer emission region with the occurrence probability larger than 30% is located at 75°–85° in 10–18 MLT in the dayside and at 60°–70° in 18–02 MLT in the night side. It is suggested that the hiss and saucer emission regions in the dayside are closely related to field-aligned currents in the cusp region. It is also found that the altitude of the saucer emission region shows a clear seasonal variation, i.e., saucer emissions are observed in the altitude range of 500–4000 km with a maximum occurrence at 2500–3000 km in the austral winter season (April–September), while they are observed at the altitude higher than 3000 km in the summer season.

要旨: 第 17 次南極地域観測隊は、昭和基地に人工衛星テレメトリー受信装置を設置し、1976 年 4 月より電離層観測衛星 ISIS-1 号および 2 号の電離層トップサイトサウンダーおよび VLF 広帯域放射データの受信を開始した。本論文では、第 17 次隊、第 18 次隊による ISIS-1 号、2 号受信データを用い、極域における VLF ヒス・ソーサーの発生領域を調べた。その結果、ヒスの発生頻度は 10–14 MLT の磁気緯度 75°–85° 付近および 20–02 MLT の 65°–80° 付近で最大になり、一方ソーサーはヒスの領域よりもやや低緯度側に位置していることが見出された。昼間側のヒスとソーサーは、その発生領域の位置からカスプ領域の低エネルギー電子フラックスと関連が深いと思われる。

* 電気通信大学, University of Electro-Communications, 5-1, Chofugaoka 1-chome, Chofu 182

** 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo

1. は じ め に

第 17 次南極地域観測隊（以下第 17 次隊と略す）は、昭和基地に人工衛星テレメトリー受信装置を設置し、人工衛星による超高層観測態勢を整えるとともに、人工衛星、ロケット、地上観測網による立体的同時観測態勢も整備した。人工衛星による超高層観測は第 18 次、19 次隊によって引継がれ、現在第 20 次隊が観測を続行中である。

第 17 次隊は、1976 年 4 月よりカナダ・アメリカによる極軌道電離層観測衛星 ISIS-1 号、2 号の電離層トップサイドサウンダー および VLF 広帯域 (5 Hz-30 kHz) 放射のテレメトリー受信を開始した。第 17 次、18 次隊の受信した 1976 年 5 月から 1978 年 1 月までの VLF テータの中で、データの質が良く解析に使用できる テータの数は表 1 に示されるように、ISIS-1 が 110 軌道分、ISIS-2 が 155 軌道分である。これらの VLF テータを用い、 $f-t$ (周

表 1 1976 年 5 月-1978 年 1 月の間、昭和基地で受信された ISIS-1, 2 の軌道数

Table 1 Pass number of the ISIS-1 and 2 satellites whose VLF data were received at Syowa Station in the period of May 1976-January 1978.

Month	ISIS-1	ISIS-2
1976 May		1
June	7	7
July	3	11
Aug	3	7
Sep.	3	21
Oct	1	3
Nov	5	19
Dec	12	18
1977 Jan	6	
Feb	16	7
Mar	2	2
Apr	5	3
May	1	6
June	8	9
July	14	16
Aug	6	1
Sep.	2	6
Oct	3	6
Nov	2	3
Dec	6	4
1978 Jan.	5	5
Total	110	155

波数-時間) スペクトルを作成し, 衛星位置と高度およびそのスペクトルから, 極域における VLF 放射の種類とその分布について考察を試みた.

なお 1978 年 2 月 4 日に, 東京大学宇宙航空研究所の衛星 EXOS-A (極光) が予定軌道 (軌道傾斜は 65° の準極軌道) に打ち上げられ, VLF 広帯域放射および静電波に関するデータの受信が昭和基地において第 19 次, 20 次隊によって順調に行われている (福西他, 1978).

2. 昭和基地でのデータ取得

昭和基地に設置された人工衛星受信装置については, すでにその詳細が NAGATA *et al.*,

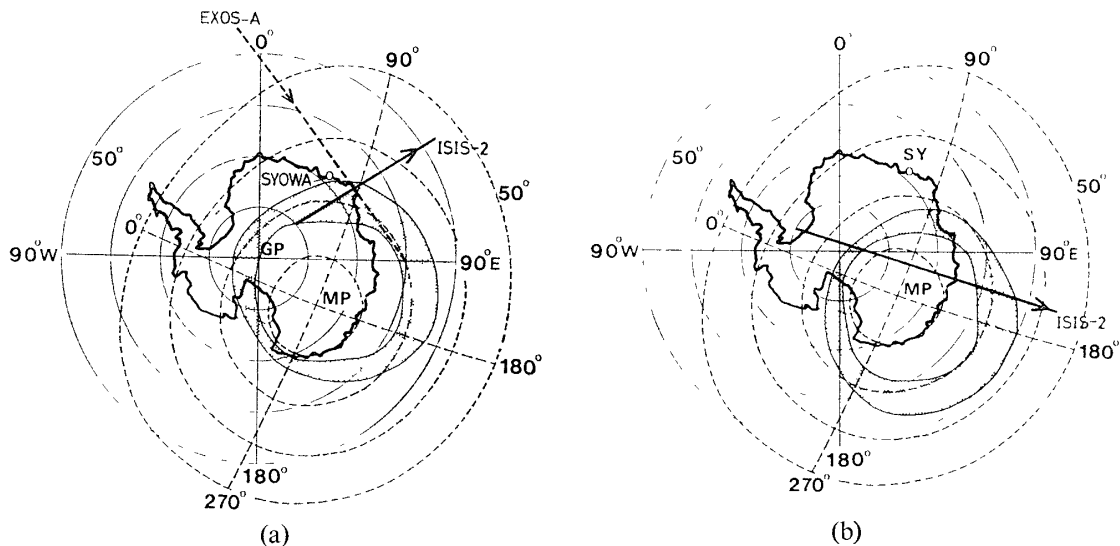


図 1 昭和基地で受信された ISIS-2 号衛星の軌道とオーロラ・オーハルの関係 オーロラ・オーハルは corrected geomagnetic coordinate (HAKURA, 1965) に対しプロットしてある.

(a) 1976 年 7 月 28 日 2217-2229 UT (軌道番号 24639) の例 ISIS は夕方側のオーハルを通過して低緯度側へ移動していく. 1978 年 7 月 31 日の EXOS-A (極光) (軌道番号 1901) の軌道も同時に示されている.

(b) 1977 年 7 月 15 日 1613-1626 UT (軌道番号 29105) の例 ISIS は昼間のカusp領域から, polar cap を通り, 夜中付近のオーロラ・オーハルを横切って低緯度側へ移動していく

Fig 1 Relationship of the ground track of ISIS-2 to the auroral oval established by FELDSTEIN (1973) The corrected geomagnetic coordinate given by HAKURA (1965) is shown in broken lines

(a) Example of ISIS-2 passing through the eveningside auroral oval (Rev No 24639, 2217-2229 UT, July 28, 1976) The ground track of EXOS-A (Kyokkô) is also shown in the figure

(b) Example of ISIS-2 which moved from the dayside cusp region to the nightside auroral oval through the polar cap (Rev No 29105, 1613-1626 UT, July 15, 1977)

(1976) により報告されているので、ここでは述べない。ISIS-1 号衛星 (69-009A) は、1969 年 1 月 30 日に打ち上げられ、遠地点は 3526 km、近地点は 578 km、軌道傾斜角は 88.42° 、周期は 128 分 40 秒である。一方 ISIS-2 号衛星 (71-024A) は、1971 年 4 月 1 日に打ち上げられ、遠地点 1428 km、近地点 1358 km のほぼ円軌道を採用。軌道傾斜角は 88.1° 、周期は 113 分 36 秒である。

図 1a に昭和基地が夜 (~ 22 UT, 昭和基地では MLT は UT にほぼ等しい) に位置したとき、昭和基地上空付近を通る ISIS 衛星の代表的な軌道を示す。この軌道では ISIS 衛星は、夕方側のオーロラ・オーバルに沿って昭和基地に近づき、昭和基地付近でオーバルを抜け低緯度側へ移動して行く。第 17 次隊で受信した軌道はこうした例が多い。図 1b に昭和基地が、オーロラ・オーバルの午後側 (~ 15 UT) に位置したとき、ISIS 衛星が昼間側から geomagnetic pole 付近を通り夜側へ移動していく代表的な軌道を示す。第 18 次隊で受信したも

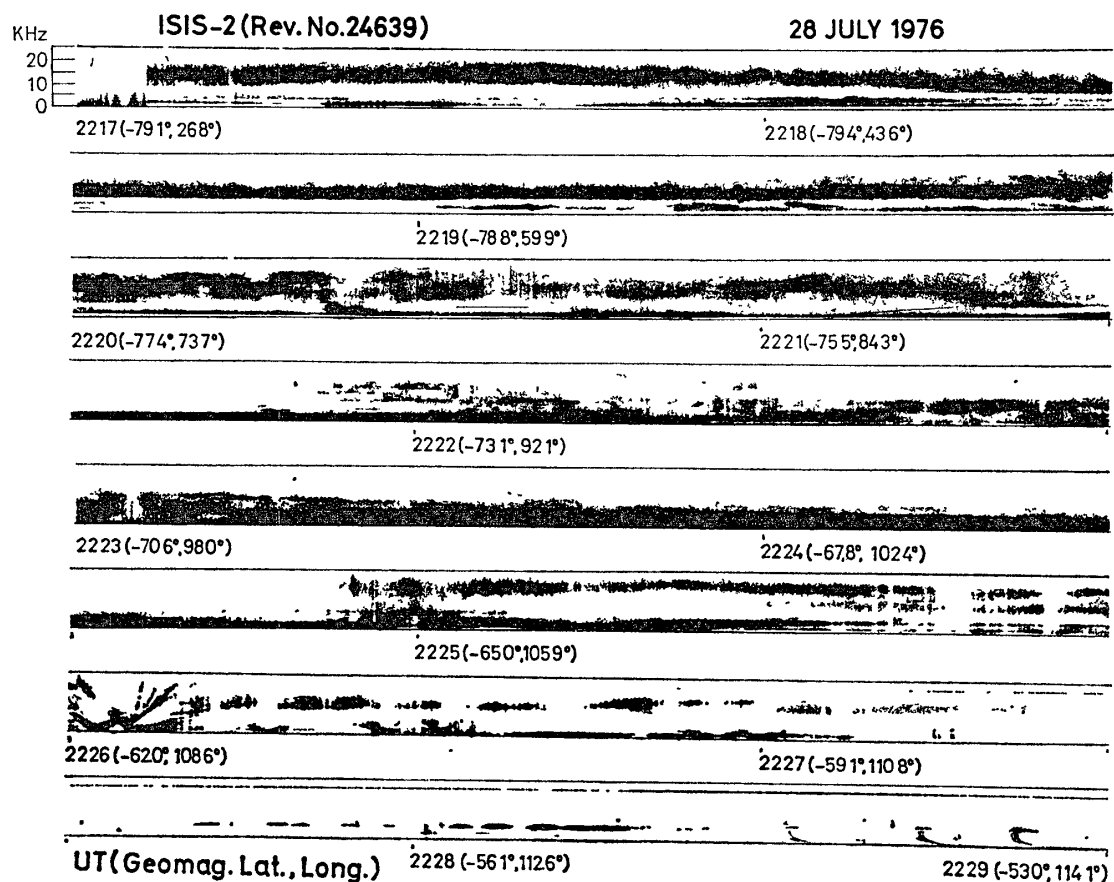


図 2 典型的な緯度変化を示す冬の ISIS-2 号 VLF スペクトラムの例

Fig 2 Typical example of the ISIS-2 VLF spectrum showing a successive occurrence of VLF hiss, saucer and whistler when the satellite moves from high latitude to low latitude.

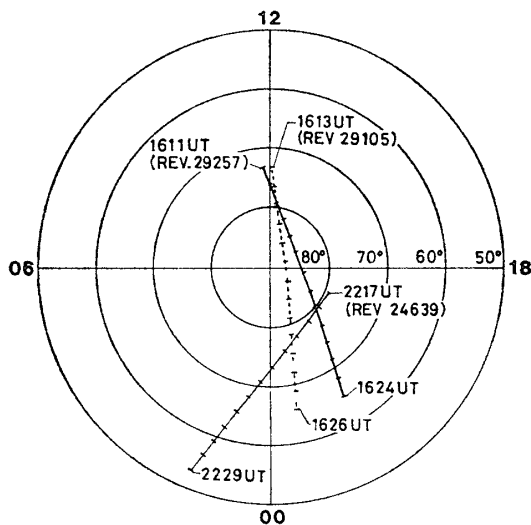


図 3 地磁気緯度と地磁気時間に対する ISIS-2 号の軌道図

Fig 3 Ground tracks of three ISIS-2 passes in a polar plot of the geomagnetic latitude-geomagnetic time coordinate

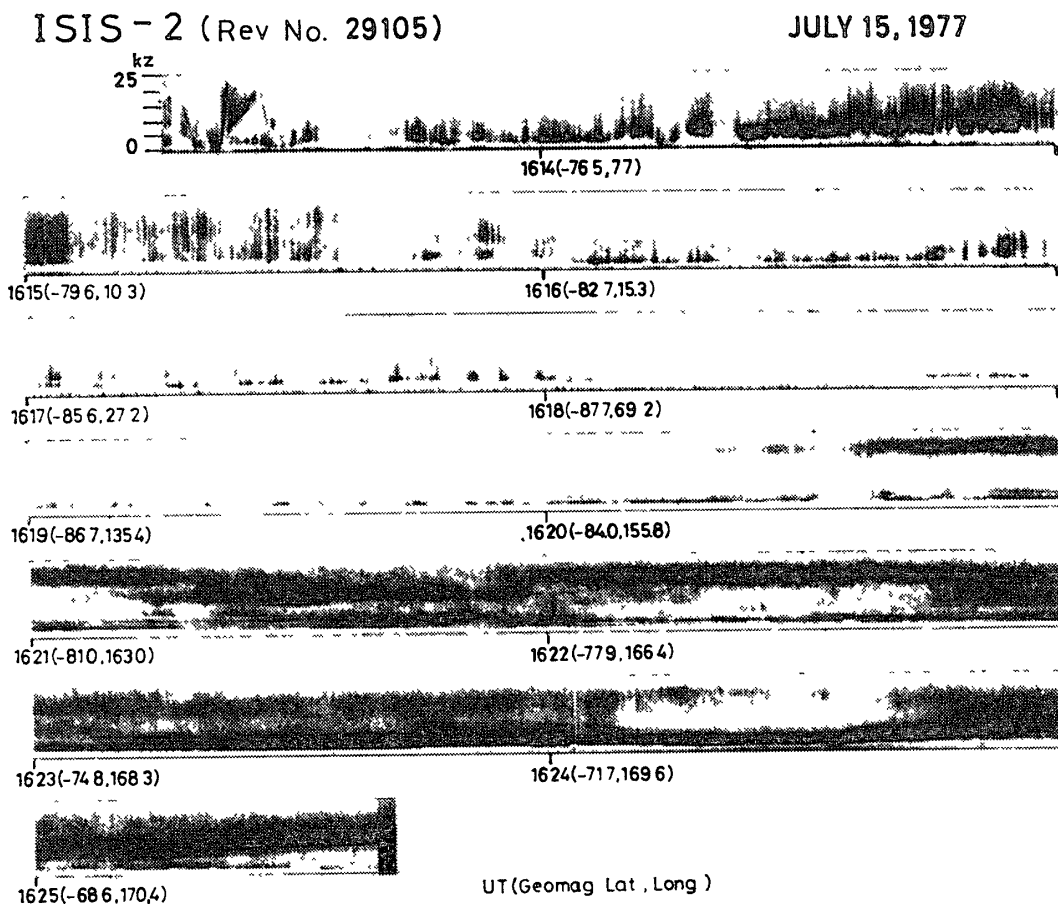


図 4 Noon-midnight meridian に沿って昼間側のカusp領域から夜側のオーロラ・オーハルを横切る ISIS-2 号によって観測された VLF スペクトラムの例

Fig 4 Typical example of the ISIS-2 VLF spectrum showing latitude-dependent occurrences of hiss and saucer emissions The ISIS-2 satellite moved from the dayside cusp region toward the nightside auroral oval along the noon-midnight meridian

のの中にはこうした軌道が多い。この軌道では衛星は昼間のカस्प領域、polar cap (極冠域) および夜中付近のオーロラ・オーバルを連続して横切っていくので、VLF 放射の緯度変化の様子が顕著にみられる。なお図 1a に示されるように、EXOS-A (極光) の軌道は、ISIS の軌道と直交しており、経度方向の変化の観測ができる点に特長がある。

図 2 は、冬季の極域における VLF 放射分布の緯度特性を示す典型的な例である。このときの地磁気緯度と地磁気時間に対する衛星軌道は、図 3 に示される。衛星は、夕方側 (~19 MLT) の地磁気緯度 80° 付近から真夜中の低緯度側に向かって移動して行くが、 62° より高緯度側では周波数の上限が 20 kHz 程度の広帯域のヒスが、連続して観測される。ヒスの下限周波数は、2224 UT (磁気緯度 68°) 付近で一番低くなり、それより低緯度側に移動するとふたたび高くなる。2226–2227 UT (62° – 59°) の間に V 字型または双曲線状の VLF ソーサー (GURNETT and FRANK, 1972; 尾崎他, 1979) が観測される。衛星がさらに低緯度側に進むとホイストラが現れる。

図 4 は、ISIS-2 号が地磁気の noon-midnight meridian に沿って昼間側から夜側へ移動した例で、このときの衛星軌道は図 3 に示される。始め昼間側の地磁気緯度 75° 付近まで VLF ソーサーが現れ、引続いて 85° 付近まで VLF ヒスが現れる。そして磁極付近では VLF エミッションはなくなり、夜側の 82° 付近から再びヒスが出現する。

3. VLF ヒスの発生領域

第 17, 18 次隊によって受信された ISIS-2 号 155 軌道のデータをを用い、その f - t スペクトルより VLF ヒスの発生頻度を求め地磁気緯度 (magnetic latitude) と地磁気時間 (MLT) に対しプロットした。図 5a は、全期間の統計結果であるのに対し図 5b, c は、ヒスの発生領域の季節変化の様子をみるため冬期間 (4 月–9 月) と夏期間 (10 月–3 月) に分けて統計した結果である。統計は、地磁気緯度を 5° ごとに、地磁気時間を 2 時間ごとに分割し、各領域での発生頻度をパーセントで表した。図 6a は統計に使用した 155 軌道の地磁気緯度と MLT に対する分布の状態を示す。極地域がかなり均一にカバーされていることが分かる。ただし、図 6b, c に示されるように季節的には軌道がかなりかたよっている。すなわち冬期間は 20–06 MLT の領域がよくカバーされているのに対し、夏期間はこの時間帯のカバーが非常に少ない。

これらの図より以下のことが分かる。

- 1) 発生領域は 60° より極側に限られる。

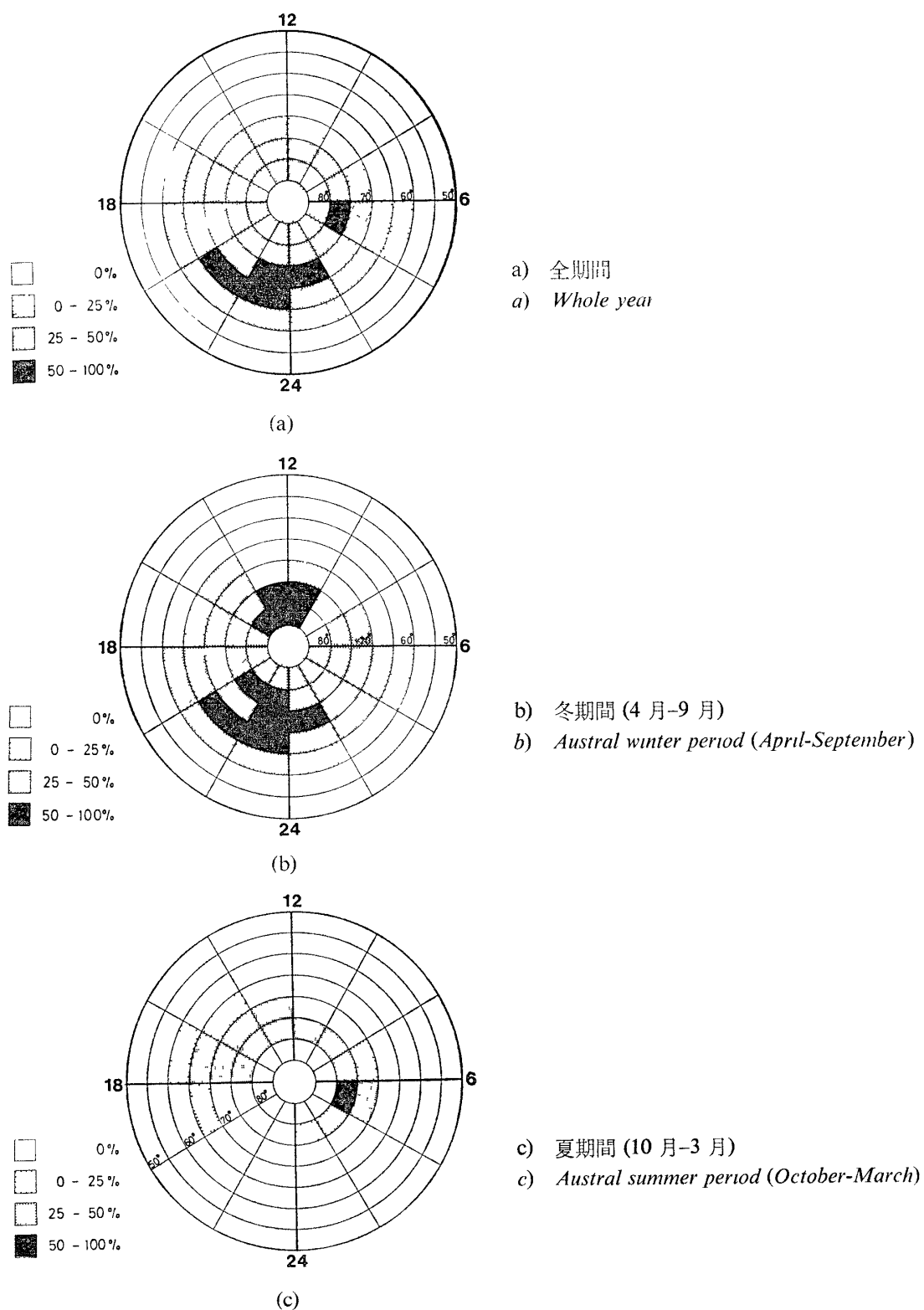


図 5 地磁気緯度と地磁気時間に対する VLF ヒスの発生頻度

Fig. 5 Polar plot of VLF hiss occurrence percent in the geomagnetic time and latitude

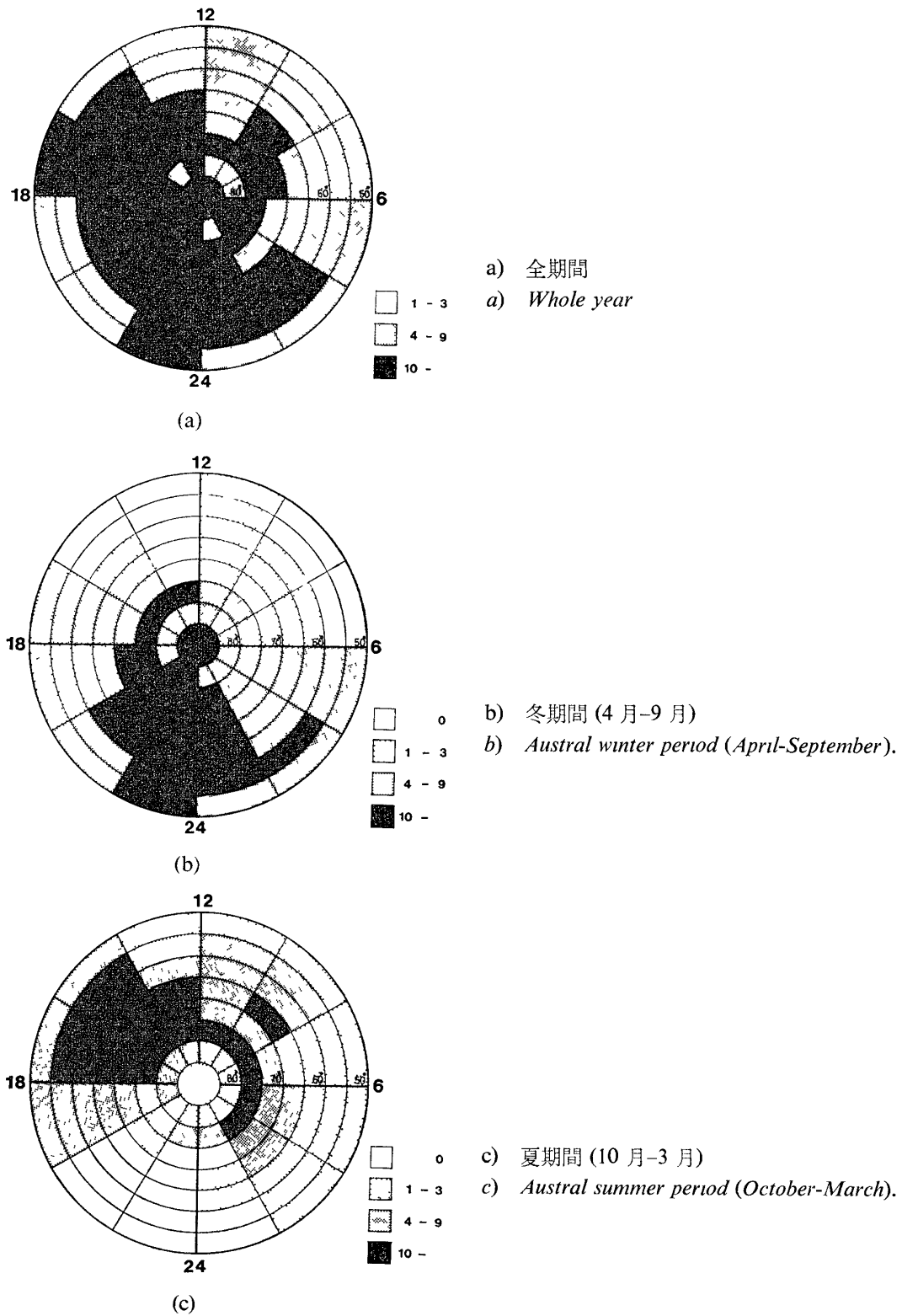


図 6 統計に使用した ISIS-2 号 155 軌道の地磁気時間と緯度に対する分布図
 Fig 6. Polar plot of the 155 passes of ISIS-2 in the geomagnetic time and latitude

- 2) すべての時間帯で観測される。
- 3) 昼間側の領域は 70° – 85° に位置し, noon-midnight meridian に関しかなり対称的に分布している。この領域は, カスプ領域に対応していると思われる。
- 4) 夕方から夜側の発生領域は 60° – 85° の広範囲にわたり, 20–02 MLT 付近に高い発生頻度の領域が認められる。
- 5) 地磁気軸極 (geomagnetic pole) を中心とした 85° 以南の発生頻度は非常に低い。
- 6) 夏期間の軌道カバーが悪く夜側の季節変化に関しては, はっきりした結論は得られないが, 昼間側に関していえば, 発生頻度は冬がやや高い。また夏期, 04–06 MLT の 70° – 80° の領域でヒスの発生頻度が高くなる。

4. VLF ソーサーの発生領域

前述の VLF ヒスにおけると同様にして, VLF ソーサーの地磁気緯度と時間 (MLT) に対する発生頻度の分布 (第 17, 18 次隊で受信した ISIS-2 号 155 軌道の結果) を図 7 に示す。この図より以下のことが分かる。

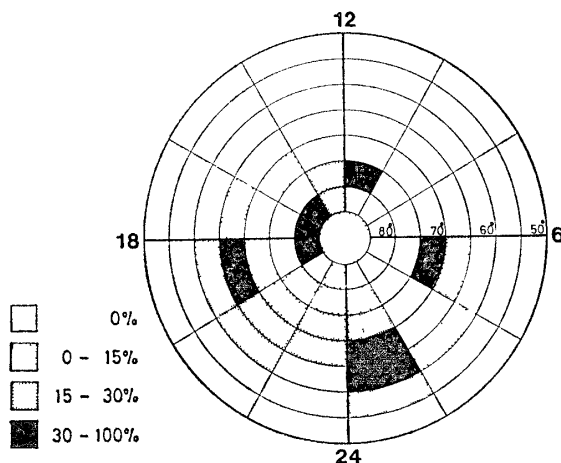


図 7 地磁気時間と緯度に対する VLF ソーサーの発生頻度

Fig 7. Polar plot of VLF saucer occurrence percent in the geomagnetic time and latitude

- 1) 発生頻度はヒスより低い。
 - 2) ヒスと同じく夜側に発生頻度の高い領域があるが, その緯度はヒスの発生領域よりやや低緯度側で 55° – 75° に位置する。
 - 3) ヒスと同じく昼間側の 75° – 85° にソーサーの発生領域がある (図 4 参照)。
- ソーサーの発生頻度の季節変化はヒスよりもさらに顕著で, 冬季に高く, 夏季は非常に低

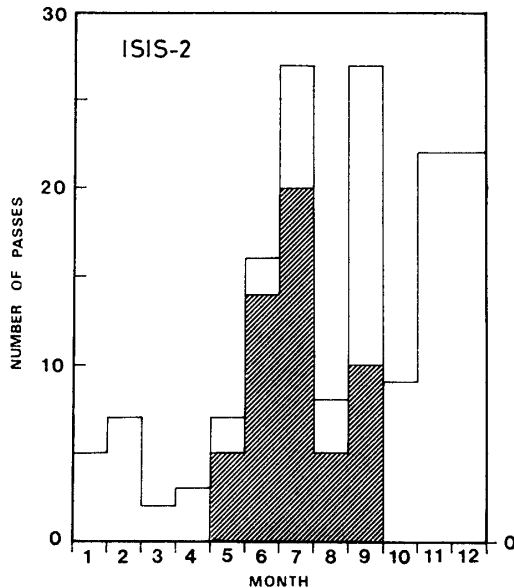


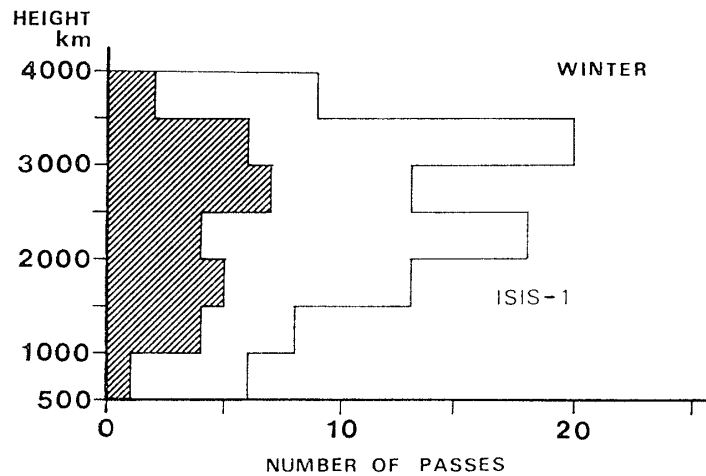
図 8 ISIS-2 号で観測された VLF ソーサーの発生頻度の季節変化。白のヒストグラムは ISIS-2 号の月別軌道数を、斜線の部分は、ソーサーが観測された軌道の数を表す。

Fig. 8. Seasonal variation of occurrence number of VLF saucer emissions. The unhatched histogram represents the monthly pass number of ISIS-2 whose VLF data were analyzed, while the hatched area represents the pass number when VLF saucer emissions were observed on ISIS-2.

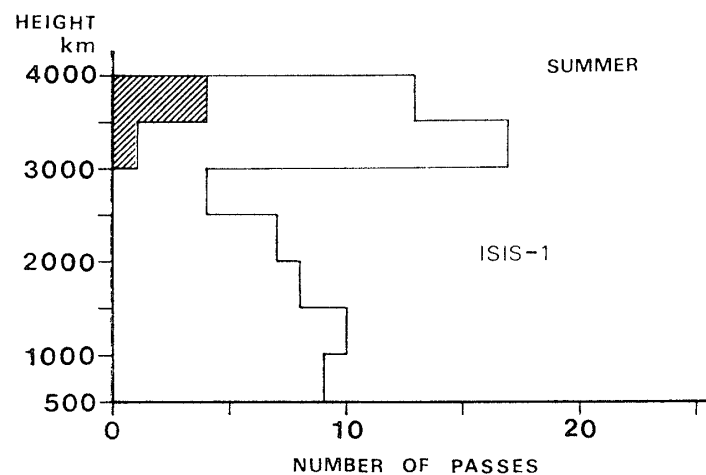
い。図 8 は ISIS-2 号で、ソーサーが観測された場合の軌道数を月別に示す。また ISIS-2 号の月別軌道数も図 8 の中に同時に示されている。この図より明らかなように 10 月-4 月までの夏期、ISIS-2 号でソーサーはまったく観測されなかった。しかし、ISIS-1 号では夏期でも若干ソーサーが観測された。夏期のソーサーがどういう条件のときに起こるかを明らかにするため、ISIS-1 号が近地点 578 km、遠地点 3526 km の楕円軌道であることを利用し、冬期 (4 月-9 月) と夏期 (10 月-3 月) のソーサーの高度分布を求めた (図 9)。この図よりソーサーは冬期は 2500-3000 km に最大発生頻度をもつものに対し、夏期は 3000 km 以下では観測されず、それより高度が高くなるにつれ発生頻度も高くなることが分かる。ISIS-2 では 1400 km の円軌道であるから夏期ソーサーが ISIS-2 でまったく観測されなかったのもこの高度分布の季節変化でうまく説明される。

5. 検 討

極域におけるヒスの発生領域に関してはすでに GURNETT (1966) と HUGHES *et al.* (1971) の統計結果がある。GURNETT (1966) は軌道傾斜角 70.4° 、遠地点 2785 km、近地点 236 km の Injun-3 号衛星のデータを用い、5.5-8.8 kHz 帯で、強度が $3 \times 10^{-10} \text{ } \gamma^2/\text{Hz}$ 以上の現象をプロットした (図 10a)。軌道傾斜角が 70.4° のため磁気緯度が 82° 以上の領域はカバーされないが、この分布図は図 5 に示した ISIS 衛星の結果と dusk side (12-24 MLT) はかなりよく似ていることが分かる。一方 HUGHES *et al.* (1971) は、Ariel-3 号衛星 (高度 550 km、軌道傾斜



(a)



(b)

図 9 VLF ソーサーの発生領域の高度分布 白いヒストグラムは ISIS-1 号の全軌道数を表し、斜線部分はソーサーが観測された軌道の数を表す
 a) 冬期間 (4 月-9 月)
 b) 夏期間 (10 月-3 月)

Fig 9 Number of VLF saucer events as a function of altitude The hatched histogram indicates the number of passes when saucer emissions were observed on board ISIS-1, while the unhatched area indicates the total number of the ISIS-1 passes used for data analysis

- a) Austral winter period (April-September)
 b) Austral summer period (October-March)

角 80°) のデータを用いヒスの発生領域を求めた。図 10b は、南半球が冬の期間の 9.6 kHz における強度 $3 \times 10^{-14} \text{ } \gamma^2/\text{Hz}$ 以上の現象の発生頻度をプロットしたものである。図 10b は午前側と午後側がかなり対称的になっている。図 10a と図 10b の違いは、図 10a がより強度

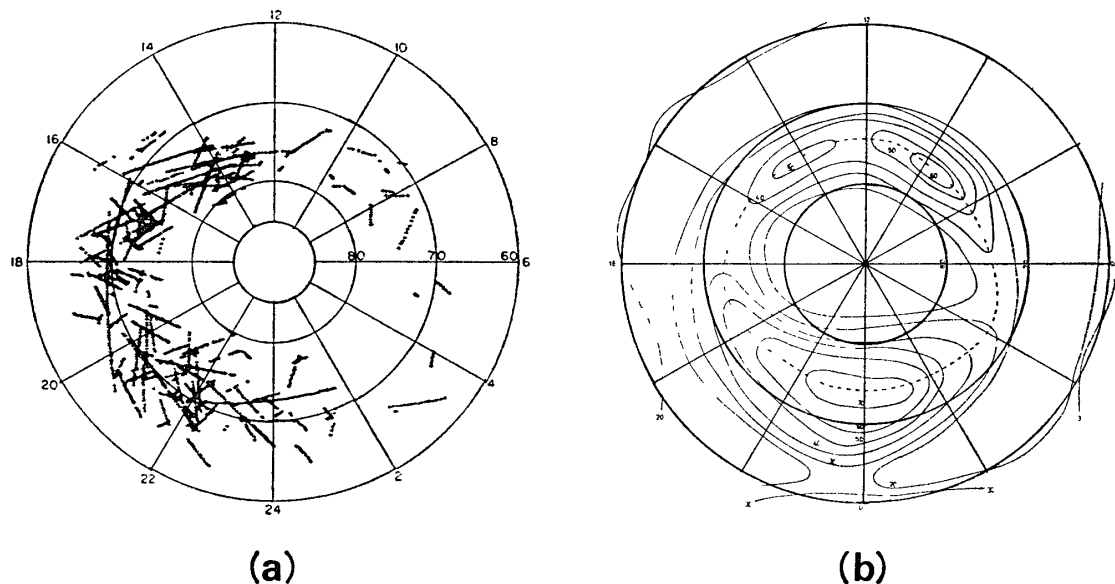


図 10 極軌道衛星で観測された VLF ヒスの発生領域. (a) Injun-3 号で観測されたヒスの MLT-INV (magnetic local time-invariant latitude) 座標系での発生領域 (GURNETT, 1966). 図では 5.5-8.8 kHz 帯で強度が $3 \times 10^{-10} \gamma^2/\text{Hz}$ 以上のヒス現象がプロットされている. (b) Ariel-3 号で観測された VLF ヒスの MLT-INV 座標系での発生頻度分布 (HUGHES *et al*, 1971). 9.6 kHz で強度が $3 \times 10^{-14} \gamma^2/\text{Hz}$ 以上の現象で、1967 年 5 月 5 日から 7 月 24 日まで南半球で観測されたものがプロットされている.

Fig. 10. Occurrence regions of VLF hiss events in the MLT-INV coordinate. (a) Polar plot of VLF hiss events with magnetic spectral density higher than $3 \times 10^{-10} \gamma^2/\text{Hz}$ at 5.5-8.8 kHz (after GURNETT, 1966). (b) Polar plot of occurrence percent of VLF hiss events with magnetic spectral density higher than $3 \times 10^{-14} \gamma^2/\text{Hz}$ at 9.6 kHz which were observed on Ariel-3 in the Southern Hemisphere for the period May 5 to July 24, 1967 (after HUGHES *et al*, 1971)

の高い現象の発生領域を表しているのに対し、図 10b は非常に弱い強度のエミッション現象も含めているためと思われる。GURNETT (1966) や HUGHES *et al*. (1971) は固定周波数での強度データを用い発生領域を求めたが、これが図 5 に示した $f-t$ スペクトルを用い求めたヒスの発生領域とかなりよい一致を示すことから、両者は同じ現象をみていると思われる。

ソーサーの発生領域は、ヒスの発生領域よりやや低緯度側であることが図 5, 7 で示された。午後側のヒスとソーサーの発生領域の関係は、IJJIMA and POTEMRA (1976) が示した沿磁力線電流 (field-aligned current) の流出と流入の領域にそれぞれ対応しているように思われ、ヒスが電離層から出ている電流によって、またソーサーが電離層に入る電流により励起されていることが示唆される。特に昼間側の 12 MLT 付近の $75^\circ-85^\circ$ にソーサーの領域が存在

することから、カस्प領域に関連した *field-aligned current* がソーサー発生に寄与している可能性が考えられる。

ヒスの発生頻度が、冬期に大きく夏期に小さい理由の1つとして電離層の電子密度が考えられる。最近 MAGGS (1978) や MAKITA (1978), YAMAMOTO (1979) により、ヒスは入射電子ビームによる *convective instability* によって起こされていることが示唆されたが、この機構では波の成長率はバックグラウンドのプラズマ密度に対する電子ビームの密度に比例する。そこで夏期に電離層の電子密度が上昇するとヒスの発生は押えられる。しかし、衛星高度でのヒスの季節変化に関しては、HUGHES *et al* (1971) はそれほど大きな変化はないと述べており、今後さらに詳しい解析が必要と思われる。ソーサーの季節変化はヒスよりもずっと顕著であり、夏期には高度 3500 km 以上にしか起こらないことが示された。その原因としてヒスと同じく電離層電子密度の上昇が考えられるが、ソーサーが、電離層起源の上向き電子ビ

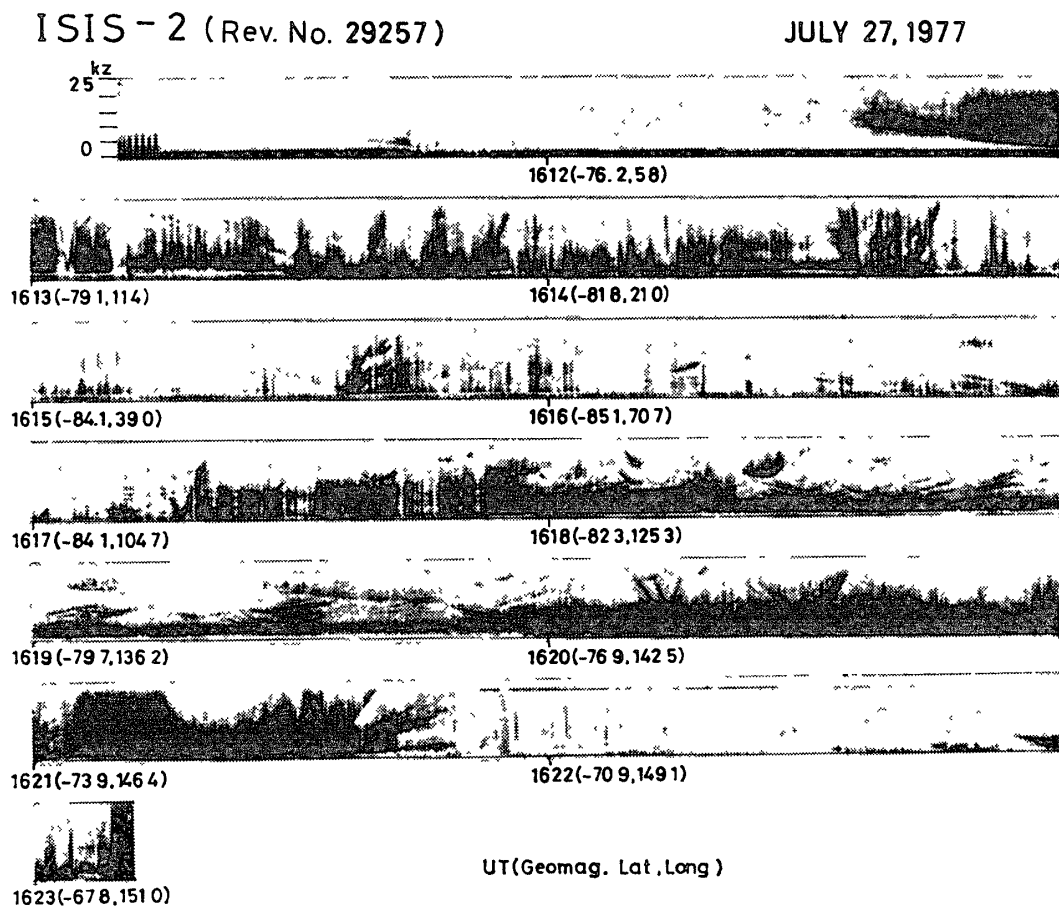


図 11 静穏日に polar cap で観測されたソーサーの例

Fig. 11 Example of VLF saucer emissions observed in the polar cap during quiet time

ームにより起こされている可能性が指摘された (GURNETT and FRANK, 1972) ほかは, あまりはっきりした機構は考えられておらず, 今後理論と観測の両面から詳しい検討が必要と思われる。

ソーサーは一般的にヒスの領域よりも低緯度側に観測されたが, Kp が非常に低い時, 極冠帯で連続的にソーサーが観測されることがある。図 11 はその例で, このときの ISIS 衛星の軌道は図 3 に示される。この日の Kp インテックスは, (0, 1-, 1, 0+, 1, 0+, 0+, 2-) で, 衛星観測時 (1611-1623 UT) の Kp は 0+ である。この原因がオーロラ・オーバルが非常に高緯度まで移動したためか, 静かな日には極冠帯で何らかのソーサーの発生しやすい条件がつけられるかは不明である。

謝 辞

昭和基地において日夜衛星テレメトリー観測を続け, 多数の良質のデータを受信していただいた第 17 次隊松尾敏郎隊員, 第 18 次隊町田進隊員はじめ第 17 次, 18 次隊の全隊員に深く感謝致します。また ISIS 衛星観測を国立極地研究所と共同で実施されている郵政省電波研究所の松浦延夫氏, 恩藤忠典氏に深く感謝致します。

文 献

- FELDSTEIN, Y. I. (1973): Auroral oval. *J Geophys. Res.*, **78**, 1210-1213.
- 福西 浩・岩渕美代子・芳野超夫 (1978). 昭和基地における EXOS-A (極光) の受信. 南極資料, **62**, 71-79
- GURNETT, D. A. (1966): A satellite study of VLF hiss. *J Geophys. Res.*, **71**, 5599-5615.
- GURNETT, D. A. and FRANK, L. A. (1972): VLF hiss and related plasma observations in the polar magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **77**, 172-190
- HAKURA, Y. (1965): Tables and maps of geomagnetic coordinates corrected by the high order spherical harmonic terms. *Rep. Ionos. Space Res. Jpn.*, **19**, 121-157.
- HUGHES, A. R. W., KAISER, T. R. and BOLLOUGH, K. (1971): The frequency of occurrence of VLF radio emissions at high latitudes. *Space Research*, **11**, 1323-1330.
- IJIMA, T. and POTEMRA, T. A. (1976): Field-aligned currents in the dayside cusp observed by Triad. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5971-5979.
- MAGGS, J. E. (1978): Electrostatic noise generated by the auroral electron beam. *J Geophys. Res.*, **83**, 3173-3188.
- MAKITA, K. (1978): Study of auroral hiss emissions associated with the aurora. Ph. D. Thesis, Univ. of Tokyo.
- NAGATA, T., YOSHINO, T., HIRASAWA, T. and FUKUNISHI, H. (1976): Substorm observations by sounding rockets and by reception of polar-orbiting satellite data. *Mem Natl Inst Polar Res, Spec. Issue*, **6**, 1-14.

尾崎孝之・岩瀬政之・芳野起夫・松尾敏郎・福西 浩 (1979) ISIS-1, 2 で観測された VLF ソーサーの特性. 南極資料, **64**, 167-178.

YAMAMOTO, T (1979): On the amplification of VLF hiss. Planet. Space Sci., **27**, 273-284

(1979 年 5 月 31 日受理)